

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Atmosférické přepětí na venkovním vedení

Atmospherical Overvoltage on the Overhead Line

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **David Hecht**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Atmosférické přepětí na venkovním vedení**
Atmospherical Overvoltage on the Overhead Line

Zásady pro vypracování:

1. Na modelu v programu EMTP-ATP řešte úder blesku do vedení.
2. Charakterizujte způsob ochrany vedení různých napěťových hladin.
3. Modelujte zpětný přeskok a ochranné působení přepětíové ochrany.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dokumentace programu EMTP-ATP

Mach, V.: Technika vysokého napětí. Ostrava : ES VŠB-TUO, 2006

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Věslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při vypracování této, bakalářské práce je legální.

V Ostravě, dne 7. 5. 2015

A handwritten signature in blue ink, reading "David Hecht", written over a dotted line.

David Hecht

Poděkování

Tímto způsobem bych rád poděkoval panu doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi za podnětné připomínky, cenné rady, nekonečnou trpělivost a metodické vedení této práce.

Dále bych chtěl poděkovat svým blízkým za podporu, trpělivost a pomoc při studiu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá prostředky ochrany proti blesku a modelování úderů do vedení pomocí programu EMTP-ATP. Cílem je seznámit čtenáře s problematikou týkající se úderu blesku do vedení s následným podtržením důležitosti chránění pro úderům blesku. V první části této práce je osvětlen princip vzniku elektrického výboje mezi oblakem a zemí a je zde charakterizován bleskový výboj a jeho základní parametry. Druhá část práce se zabývá ochranou vedení před úderem blesku a způsoby úderu blesku do vedení. Dále jsou v této části rozebrány nejčastější prostředky ochrany proti úderu blesku umístěvané na vedení a jejich charakteristika. Ve třetí části jsou modelovány dva případy následků úderu do vedení a to úder do zemnicího lana se vznikem zpětného přeskočů a úder do zemnicího lana s následnými průběhy napětí a proudů charakterizujícími přepětovou ochranu.

Abstract

This thesis deals with the means of protection against lightning strikes and modeling of lightning strikes to high voltage overhead lines using the EMTP-ATP. The aim is to acquaint the reader with problems related to lightning strike into the line, followed by underlining the importance of protection against lightning strikes. In the first part of this work is explained principle of the electrical discharge between cloud and ground and is characterized a lightning and its basic parameters. The second part deals with line protection against lightning and ways how lightning can strike to the line. Furthermore, this part analyzes the most common means of protection against lightning strikes that are placed on overhead line and their characteristics. In the third part are modeled two cases the consequences of a strike to the line. Strike to the ground wire followed by the backflash over and strike to the ground wire with subsequent analysis of voltages and currents that characterize this surge protection.

Klíčová slova

Přepětí, VVN, Zemnicí lano, Přepětová ochrana, Blesk, EMTP-ATP

Key words

Surge, Overvoltage, High Voltage, Ground Wire, Surge Protection, Thunder, EMTP-ATP

Seznam použitých symbolů a zkratek

AlFe	lano s hliníkovým jádrem a železným pláštěm
I_{\max} (A)	maximální hodnota proudu blesku
I_n (A)	jmenovitý výbojový proudbleskojistky
MOV	Metal Oxid Valve
SiC	karbid křemičitý; karbid křemíku
T_c (μs)	doba čela normalizovaného atmosférického impulsu napětí
T_p (μs)	doba půltýlu normalizovaného atmosférického impulsu napětí
U_c (kV)	trvalé provozní napětí omezovače přepětí
U_{\max} (V)	maximální hodnota přepětí způsobeného bleskem
U_r (V)	rázové zapalovací napětíbleskojistky
U_{zn} (V)	jmenovité zbytkové napětíbleskojistky
V – A	Volt-Ampérová
VN	vysoké napětí (1 kV - 52 kV)
VVN	velmi vysoké napětí (52 kV – 300 kV)
Z (Ω)	impedance vedení
ZnO	oxid zinečnatý; oxid zinku

Obsah

Úvod	8
1. Charakteristika atmosférických přepětí	9
1.1. Vznik atmosférické elektřiny	9
1.2. Bleskové výboje	11
2. Ochrana vedení před atmosférickým přepětím	12
2.1. Přímý úder blesku do vedení	13
2.1.1. Úder do fázového vodiče	13
2.1.2. Úder do zemnicího lana	13
2.1.3. Úder do stožáru a zpětný přeskok	14
2.2. Prostředky ochrany před úderem blesku	14
2.2.1. Zemnicí lana	14
2.2.2. Přepět'ové ochrany	15
2.2.3. Ochranné jiskřiště	15
2.2.4. Vyfukovací bleskojistka	15
2.2.5. Ventilová bleskojistka	16
2.2.6. Svodič na bázi ZnO	17
3. Modelování atmosférických přepětí	18
3.1. Úder do zemnicího lana s následným zpětným přeskokem	18
3.2. Modelování působení přepět'ové ochrany při úderu do zemnicího lana a do vedení	23
Závěr	27
Literatura	28

Úvod

Člověk odpradáвна vzhlížel k přírodním úkazům. Blesky uchvátily jeho pozornost jako první, jelikož bouřky na zemi byly, jsou a budou. Blesk dal člověku poprvé oheň a jak se říká: „oheň je dobrý sluha, ale špatný pán.“ Proto se i v dnešní době musíme problémem blesku zabývat. Podle amerických vědců má totiž globální oteplování významný vliv na bouřkovou činnost v atmosféře. Každý 1 °C navíc podle nich zvýší četnost blesků o 12 %. Z předběžných propočtů vychází, že na každé dva blesky z roku 2000 budeme mít v roce 2100 blesky tři. [1]

O bouřkové vědě a blesku jako takovém máme stále nové poznatky. Mnohé o něm víme, ale ani zdaleka ne vše. A přitom je tento přírodní úkaz svou nevyzpytatelností velmi nebezpečný jak pro člověka, tak pro zvířata a také pro přístroje, které nám usnadňují práci. Kvůli tomu se musíme odpovídajícím způsobem chránit před poruchami rozvodné sítě v důsledku úderu blesku. V případě poruchy rozvodné sítě by mohlo dojít k výpadku dodávky elektrické energie, na které je člověk v dnešní době nenahraditelně závislý.

Z vlastního popudu a zájmu o tuto problematiku jsem se rozhodl vypracovat tuto práci, protože jsem chtěl pochopit a vysvětlit danou problematiku a vyzkoušet si modelování různých stavů elektrické sítě při úderu blesku. Do této práce je zahrnut základní úvod do teorie bouřky a blesku, způsoby úderu blesku, způsoby chránění elektrických zařízení připojených k vedení a v neposlední řadě také názorná ukázka formou modelu.

1. Charakteristika atmosférických přepětí

1.1. Vznik atmosférické elektřiny

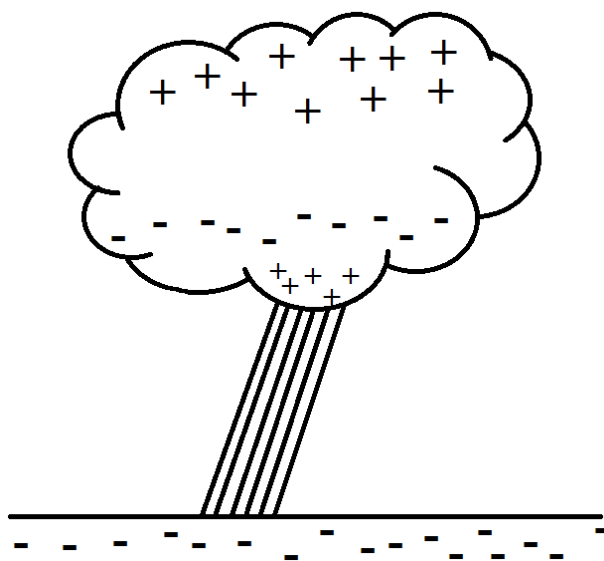
Každá částice má svůj elektrický náboj. Nabité částice vznikají při jevu zvaném ionizace, kdy dochází k vytržení nebo zachycení valenčních elektronů elektricky neutrálními částicemi. Ionizace vzduchu nastává účinky kosmického záření, což můžeme pozorovat například u rostoucí vodivosti vzduchu v atmosféře spolu s větší výškou. Díky ionizaci tak vznikají kationty nebo anionty. [2]

Takto elektricky nabité částice vyvolávají polarizaci blízkých neutrálních částic, přičemž vznikají elektrostatické síly, kterými se tyto částice spojují do větších shluků. Tyto shluky mohou být následně zachyceny aerosolovými částicemi obsaženými ve vzduchu, čímž vzniknou větší elektricky nabité částice. Tyto nabité aerosolové částice se účinky větru pohybují a narážejí do sebe, přičemž vzniká tření. Tření má za následek vznik elektrického náboje a následně vznik rozdílu potenciálů mezi jednotlivými částicemi. Takto v atmosféře vzniká elektrické napětí.

Naši planetu s atmosférou si tedy představujeme jako obrovský kulový kondenzátor. Po vzájemné úmluvě se náboj na povrchu země označuje záporným znaménkem a náboj v atmosféře znaménkem kladným. I zde platí zákon zachování elektrické energie a tak musí být absolutní hodnoty náboje v atmosféře a na zemském povrchu stejně velké. Pak můžeme hovořit o elektroneutralitě. Díky tomu, že jsou atmosféra a zemský povrch nabitý stejným nábojem opačné polarity, vytváří se mezi nimi vertikálně orientované elektrické pole, jehož intenzita je při povrchu země zhruba $130 - 140 \text{ Vm}^{-1}$. [2] [3]

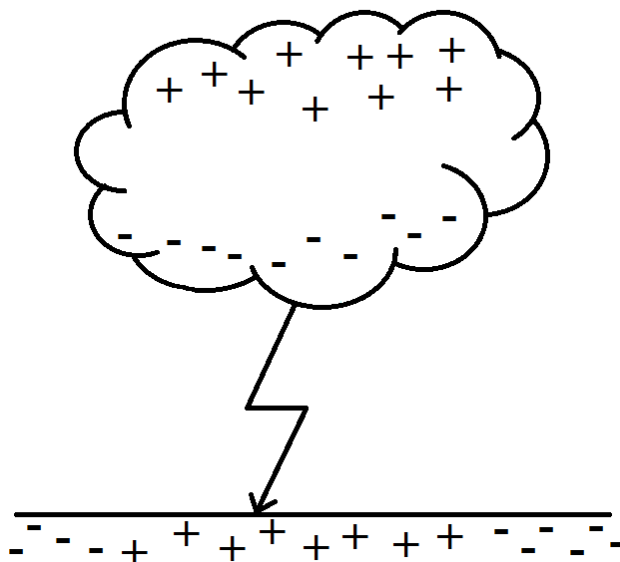
Ve velmi specifickém případě, kterým se bude tato práce převážně zabývat, nabývá hodnota intenzity elektrického pole řádově desítek tisíc Vm^{-1} a to pod základnami bouřkových oblaků (kumulonimbů).

Největší centra vzniku atmosférické elektřiny jsou bezesporu bouřkové oblaky. Bouřkové oblaky obsahují velké elektrické náboje, které se významnou měrou podílejí na udržování záporného náboje země. Bouřkový oblak (kumulonimbus) je ve své spodní části nabit záporným nábojem a v horní části stejně velkým kladným nábojem. Mimo to je při projevu bouřkové činnosti v základně oblaku menší středisko kladného náboje viz Obrázek 1. Tento kladný náboj je spojen s vylučováním srážek, protože v tomto centru panuje zdaleka „nejvyšší“ teplota z celého bouřkového oblaku. [2]



Obrázek 1 - Bouřkový oblak při srážkové činnosti

Za normálního stavu je povrch země nabit záporně, avšak při vzniku bouřky, indukuje kumulonimbus na zemském povrchu kladný náboj. To následně vede při vysoké intenzitě elektrického pole k vyrovnávání rozdílu potenciálů mezi kumulonimbem a zemí v podobě atmosférických výbojů viz Obrázek 2.



Obrázek 2 - Indukování kladného náboje na zemském povrchu při bouřce

1.2 Bleskové výboje

Pokud dojde k nahromadění velkého množství náboje ve spodní části kumulonimbu, může tento náboj prorazit vrstvu vzduchu mezi ním a zemí. Děje se tak mezi nejnižším bodem mraku a nejvyšším bodem na zemském povrchu, poté mezi těmito body vznikne blesk. Blesk může vzniknout mezi jednotlivými oblaky, uvnitř oblaku, mezi oblakem a zemí a také opačně mezi zemí a oblakem. Aby mohl vzniknout blesk mezi oblakem a zemí, musí nejprve vzniknout vodivá cesta. Ta vznikne nárazovou ionizací. Vzduch se přitom zahřívá, jeho vodivost se tím zvyšuje a tedy se stává vodivým.

Takto zahřátý a ionizovaný vzduch dosahuje teploty až 33 000 °C a vydává díky vysoké teplotě zřetelnou světelnou stopu. Odborně se označuje jako první fáze blesku, vůdčí výboj, tzv. lídr (z anglického leader = vůdce). Lídr postupuje k zemi po určitých úsecích, kdy „hledá“ cestu s nejvyšší vodivostí. Směr výboje je pak určen tzv. gradientem, tedy jakousi směrnicí postupu, která je závislá na intenzitě elektrického pole v okolí lídru a vodivosti vzduchu.

Lídr postupuje zhruba po padesátimetrových krocích, po kterých se na několik desítek mikrosekund zastaví a dále pokračuje. Rychlost postupu vůdčího výboje se udává v řádech tisíců kilometrů za sekundu. Vůdčí výboj má negativní náboj daný spodní částí kumulonimbu, který indukuje na zemském povrchu silný kladný náboj. Po dostatečném přiblížení lídru k povrchu země se vytvoří tzv. vzestupné výboje, které určují místo dopadu blesku tím, že stoupají ze země směrem k lídru. Děje se tak kvůli přitahování nesouhlasných nábojů. [4]

Vzestupné výboje vznikají na vysokých objektech vodivě spojených se zemí a mohou mnohdy dosahovat výšky až 50 m. Jakmile se vzestupný výboj střetne s lídrem, začnou směrem k zemi protékat obrovské proudy hlavním kanálem blesku. V prostoru hlavního kanálu dochází ke štěpení molekul kyslíku, přičemž vzniká O₃ – ozón. Teplota ionizovaných plynů uvnitř tohoto kanálu je až 25 000 K, napětí blesku dosáhne až 10 MV a protéká jím proud až 30 kA a to vše za zhruba jednu tisícinu sekundy. [2] [3]

2. Ochrana vedení před atmosférickým přepětím

Zařízení v elektrických rozvodech chráníme zejména proto, abychom zajistili jejich správnou a nepřerušovanou funkci a zamezili jejich zničení a znehodnocení. K tomu používáme rozličná zařízení, metody a ochranné systémy jejichž jedinou funkcí je rozpoznat poruchu a bezpečně ji izolovat od zbytku elektrické sítě.

Pro správné nastavení ochran je potřeba prozkoumat bleskový výboj mnohem důkladněji. Blesk totiž neudeří pouze jednou, ale po zaniknutí prvního hlavního kanálu se spustí po již dostatečně vodivé a ionizované dráze další líder, za kterým následuje nový hlavní výboj. Každý blesk sestává z několika částečných výbojů, které dělíme na krátké a dlouhé. Krátké mají dobu trvání menší než 2 ms, dlouhé naopak delší než 2 ms. Tyto výboje dále dělíme podle pozice v hlavním výboji na první, následné nebo superponované. Ty se za sebou řadí podle toho, jedná-li se o vzestupný, nebo sestupný blesk. U vzestupných blesků se častěji setkáváme se superponovanými výboji. [5]

Abychom zjistili reakci jednotlivých zařízení, simulujeme v laboratoři atmosférický impuls pomocí normalizovaného napěťového impulsu daný polaritou, dobou čela $T_c = 1,2 \mu s$ a dobou půltýlu $T_p = 50 \mu s$ (tzv. 1,2 na 50). Pro simulaci bleskových proudů se používá dvou tvarů impulsů, 8 / 20 μs nebo 4 / 10 μs . Dalšími parametry, které nás při nastavování ochran zajímají jsou vrcholová hodnota bleskového proudu, jeho strmost a náboj. Pokud rozebíráme bleskové proudy, je důležité si také uvědomit, že tyto proudy jsou nezávislé na zatížení a bleskový výboj se chová téměř jako ideální proudový zdroj.

Rozlišujeme mezi dvěma základními způsoby úderu blesku. Blízký nebo přímý úder a vzdálený úder blesku. Při přímém úderu udeří blesk buďto přímo do objektu nebo do jeho bezprostředního okolí. To vyvolá úbytek napětí na zemním odporu a zvětšení potenciálu objektu vůči jeho okolí. Také díky vysoké hodnotě elektromagnetického pole v okolí kanálu a místa úderu blesku dojde k indukci napětí protékajícím proudem do uzavřených smyček. Toto napětí je tím vyšší, čím je větší strmost bleskového proudu.

Za vzdálený úder se považuje úder blesku do objektu přímo spojeného s uvažovaným objektem nebo do země ve vzdálenosti až několika kilometrů. Pokud uvažujeme budovu jako výchozí objekt, ke kterému vztahujeme vzdálenosti úderu blesku, považuje se za přímý úder úder do budovy,

případně její bezprostřední blízkosti. Za vzdálený úder se v tomto případě považuje úder blesku do země až do vzdálenosti dvou kilometrů, úder do venkovního vedení vysokého napětí nebo i výboje mezi mraky v blízkosti uvažované budovy nebo venkovního vedení. [5]

Přepětí, která vzniknou úderem blesku se vzduchem dokáží přenést až na vzdálenost dvou kilometrů a vlny, které se šíří po vedení, do kterého udeřil blesk, se přenášejí až na vzdálenost několika desítek kilometrů. Přitom nejvyšší špičkové hodnoty těchto vln mohou mít velikost několik desítek až stovek tisíc voltů.

2.1 Přímý úder blesku do vedení

2.1.1 Úder do fázového vodiče

Přímý úder blesku do vedení je nejnebezpečnější možný stav, který může nastat. Snažíme se mu předejít co nejvíce, neboť může mít následné vyvolání poruchy dalekosáhlé následky. Jen pro ilustraci; pokud budeme uvažovat impedanci vedení $400\ \Omega$ a velikost bleskového proudu $30\ \text{kA}$ (jak je uvedeno v kapitole 1.2.2) bude mít přepětí vzniklé úderem blesku tuto hodnotu [3]

$$U_{\max} = \frac{Z}{2} \cdot I_{\max} = \frac{400}{2} \cdot 30\,000 = 6\,000\,000\ \text{V} = 6\ \text{MV}$$

Teoretická hodnota $6\ \text{MV}$ je pro síť se jmenovitým provozním napětím $110\ \text{kV}$ opravdu obrovská zátěž, proto se jí musíme snažit vyvarovat. $6\ \text{MV}$ je již natolik destruktivní hodnota napětí, že hrozí naprosté zničení izolace vodičů, případné zkratky mezi jednotlivými fázemi a následný naprostý výpadek daného vedení nebo zničení připojených zařízení, což může způsobit velké finanční ztráty.

2.1.2 Úder do zemnicího lana

Abychom omezili problémy používá se nejčastěji ochrana zemnicími lany. Při úderu blesku se začnou na obě strany po laně šířit přepětíové vlny, které indukují napětí do fázových vodičů. Vzniklé proudy jsou svedeny skrz uzemňovací body. Protože i při použití zemnicího lana vznikne na fázovém vodiči přepětí díky elektromagnetické indukční vazbě mezi vodiči, musí se vedení chránit i jinými doplňkovými prostředky.

2.1.3 Úder do stožáru a zpětný přeskok

Při úderu blesku do stožáru nebo zemnicího lana v jeho blízkosti je největší část proudu blesku svedena do země přes stožár a zbytek bleskového proudu je odveden zemnicími lany na další uzemňovací body.

U vedení VVN je velké riziko tzv. zpětného přeskoků. Při úderu blesku dojde ke zvýšení napětí mezi zemnicím lanem (nebo stožárem) a fázovým vodičem. Pokud toto napětí vzroste nad hodnotu ochranné hladiny dané sítě, dojde k přeskočení napětí ze stožáru (či zemnicího lana) na fázový vodič a tedy ke zpětnému přeskoků. Vznik zpětného přeskoků ovlivňuje několik faktorů mezi něž patří například strmost proudového impulsu, parametry stožáru (zejména jeho indukčnost) nebo vzdálenost fázového vodiče od konstrukce stožáru.

2.2 Prostředky ochrany před úderem blesku

2.2.1 Zemnicí lana

Zemnicí lana jsou základní ochranou proti úderu blesku u vedení VVN. Lana jsou natažena mezi špičkami stožárů a jsou vodivě spojena s uzemňovacími soustavami v hlavních rozvodnách a také uzemněny skrz stožár samotný. Vlivem uzemnění tedy zemnicí lana zvyšují kapacitu vedení vůči zemi a tím snižují velikost indukovaného napětí při úderu blesku do blízkosti vedení.

Tato zemnicí lana jsou tvořena buďto ze železa nebo častěji z železného jádra a hliníkového obalu, tzv. typu AlFe. Zemnicí lana se používají na všech vedeních VVN. U vedení VN se v některých případech používá na několika prvních kilometrech od rozvodny tzv. výběhové zemnicí lano. Používá se například při sdruženém zaústění vedení do rozvodny, což znamená, že se jako poslední tři stožáry před rozvodnou použijí místo příhradových stožárů portálové. Spolu s výběhovými lany tak vznikne soustava s velmi nízkou impedancí, což při úderu způsobí rychlý pokles přepětí a na omezovače přepětí na vstupu do rozvodny se dostane přepětí značně snížené. Výběhová lana dokáží omezit přepětí o 10 - 20 %. [6]

U zemnicího lana zavádíme tzv. ochranný úhel. Ochranný úhel je úhel, který svírá kolmice od země k zemnicímu lanu s přímkou, která spojuje zemnicí lano a fázový vodič (u vedení 110 kV se používá ochranný úhel 40°). Ochrana zemnicím lanem se nepoužívá u vedení s malou izolační pevností vodičů vůči zemnicímu lanu (VN) nebo vedení na stožárech s kovovými konzolami,

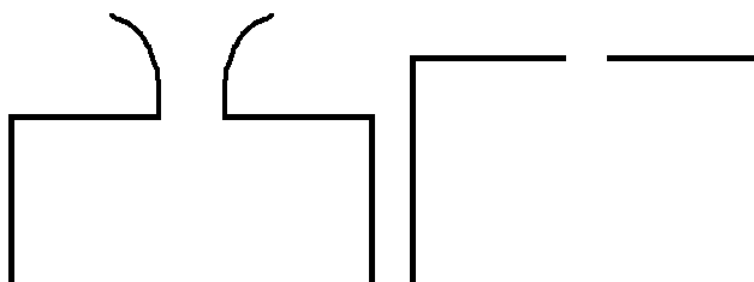
protože u nich dochází ke zpětnému přeskoku i při úderu blesku s malou amplitudou bleskového proudu. [3]

2.2.2 Přepět'ové ochrany

Ochranu před přepětím souhrnně označujeme jako přepět'ovou ochranu. Tyto ochrany mají zajistit, aby nevzniklo na chráněném objektu napětí vyšší než dovolené. Pro dosažení tohoto požadavku využívají závislost impedance na napětí. Zjednodušená funkce přepět'ové ochrany je taková, že při zvýšení napětí nad nastavenou hodnotu sníží svou impedanci a poté pojme veškerou energii výboje (svede proud do země). Přepět'ovou ochranou nesmí procházet za normálního stavu proud (její impedance je vysoká).

2.2.3 Ochranné jiskřiště

Ochranné jiskřiště je prvek s nejmenší elektrickou pevností v síti. Využívá jednoduchého principu průrazného (zapalovacího) napětí; při vzniku nebezpečného přepětí vznikne na jiskřišti průraz a vzniklým výbojem se síť spojí se zemí. Používají se jako pomocné svodiče přepětí v izolátorech a průchodkách vysokého napětí. Nejjednodušším jiskřištěm je tzv. růžkové jiskřiště. Jiskřiště v pravé části Obrázku 3 může způsobit zkratování chráněného obvodu, protože nemá žádnou schopnost omezit zkratový proud. Jiskřiště v levé straně obrázku dokáže uhasit hořící elektrický oblouk v nule proudu díky tvaru elektrod. Ten přirozeně nutí oblouk postupovat nahoru, jelikož je vytlačován proudem horkého vzduchu ohřátého samotným obloukem. [3]



Obrázek 3 - Provedení ochranných jiskřišť

2.2.4 Vyfukovací bleskojistka

Dalším typem ochrany je tzv. vyfukovací bleskojistka (Torokova vyfukovací trubice). Je tvořena jiskřištěm v trubici se stěnami z tvrzené pryže nebo fibru a otvorem ve spodní části. Od zdroje je oddělena do série zapojeným tyčovým jiskřištěm, které se nachází v otevřeném prostoru. Pokud

vznikne přepětí, obě jiskřiště se sepnou. Vzniklý elektrický oblouk v uzavřené trubici svým teplem odpařuje stěny trubice a vzniká tak směs plynů, která ochlazuje oblouk a deionizuje jeho okolí. Navíc vznikne v prostoru trubice přetlak, který je vyrovnán únikem plynů otvorem ve spodní části. Tím je oblouk „vyfouknut“ ven a roztrhnut, čímž se přeruší.

Uhašení (vyfouknutí) oblouku trvá velmi krátkou dobu; mnohem kratší než v případě ochranného jiskřiště. To má však za následek velkou hodnotu následného proudu (až jednotek kA) a vytvoření přepětíové vlny opačné polarity, která má větší strmost než původní vlna. Vyfukovací bleskojistky mají díky odpařování vnitřních stěn krátkou životnost. [3]

2.2.5 Ventilová bleskojistka

Ventilové bleskojistky se řadí do kategorie svodičů přepětí. Jsou tvořeny sériovým jiskřištěm a nelineárním odporem na bázi SiC. Pro vyšší napětí jsou prvky bleskojistky použity několikrát za sebou v sérii. Sériové jiskřiště je tvořeno několika jiskřišti zapojenými v sérii, která jsou hermeticky uzavřena v komoře. Komora je naplněna suchým vzduchem kvůli tomu, aby jiskřiště nekorodovaly a neměnily se parametry bleskojistky. Samotné jiskřiště je tvořeno kotouči umístěnými velmi blízko u sebe, která mají povrch tvarován tak, aby byla zajištěna dokonalá předionizace výbojového prostoru. [7]

Ploché elektrody mají poloviční zapalovací napětí oproti sériovým jiskřištím. Mnoho sériových jiskřišť za sebou také zamezuje nadměrnému opalování jednotlivých jiskřišť a tím má ventilová bleskojistka mnohem delší životnost než vyfukovací. Jiskřiště musí být navrženo tak, aby na něm bylo zotavené napětí rozloženo rovnoměrně, toho se dosahuje pomocí kapacitního nebo odporového řízení. Při kapacitním řízení se vkládají k elektrodám prstence slídy, které zvyšují kapacitu jiskřiště. Díky větší permitivitě teče elektrodami větší proud a ten zajistí stejné hodnoty napětí na všech jiskřištích. Odporové řízení se provádí pomocí odporu na bázi SiC. Předionizace prostoru mezi elektrodami je zajištěna vložením keramických destiček s velkou permitivitou.

Základní parametry bleskojistky jsou U_r – rázové zapalovací napětí, U_{zn} – jmenovité zbytkové napětí na bleskojistce, I_n – jmenovitý výbojový proud. [7]



Obrázek 4 - Schématická značka bleskojistky

2.2.6 Svodič na bázi ZnO

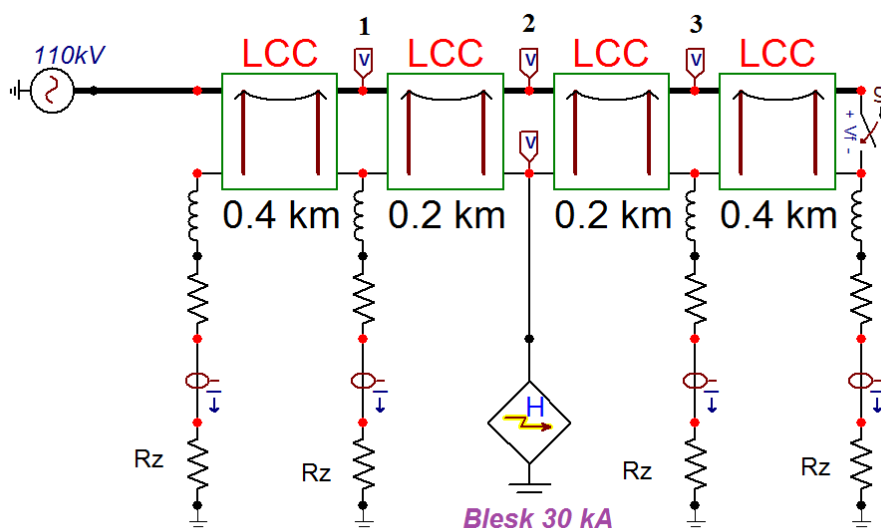
V dnešní době se čím dál více uplatňují omezovače na bázi ZnO (MOV – Metal Oxid Valve), jelikož u nich odpadá nutnost použití sériového zapalovacího jiskřiště. Odpadá u nich tedy problém ventilových bleskojistech, u kterých při ztrátě těsnosti docházelo ke korozi ochranného jiskřiště a tím ke změnám parametrů celé bleskojistky.

Tento typ svodičů přepětí se uplatňuje hlavně díky tomu, že proud protékající odporem ZnO je o řád nižší než u materiálu SiC a omezovače tedy mohou být připojeny přímo na síť. Díky vysoké nelinearitě V-A charakteristiky je přechod mezi vodivým a izolačním stavem velmi rychlý a nevznikají tak následné proudy. To umožňuje snížení ochranné hladiny a v sítích VN jsou schopny zvládat i spínací přepětí. Narozdíl od ventilové bleskojistky, která musí mít jmenovité napětí vyšší než maximální hodnota přepětí, mohou být omezovače ZnO zatěžovány vyšším napětím než napětí jmenovité. Snesou jej ovšem pouze po omezenou dobu než dojde k trvalému tepelnému poškození. Omezovače přepětí na bázi ZnO jsou navíc spolehlivější než bleskojistky, jelikož nemají tak složitou konstrukci. Navíc mohou být až o 50 % lehčí. [3] [7]

3. Modelování atmosférických přepětí

3.1 Úder do zemnicího lana s následným zpětným přeskokem

V programu EMTP-ATP je řešen úder blesku do vedení s následným zjištěním napětíových poměrů na vedení. Na Obrázku 5 je nejjednodušší možnou formou a pro maximální účelnost a názornost vytvořen model vedení. Je tvořen střídavým zdrojem o výstupním napětí 110 kV a frekvenci 50 Hz, elementem vedení typu Bergeron (obvod s rozprostřenými parametry, který je vhodný ke zkoumání rychlých přechodných dějů), proudovým zdrojem typu Heidler s hodnotou 30 kA, dobou čela a půltýlu testovacího impulsu atmosférického přepětí (8 / 20 μ s) a modelem stožáru, složeného z indukčnosti a odporů stožáru a země.



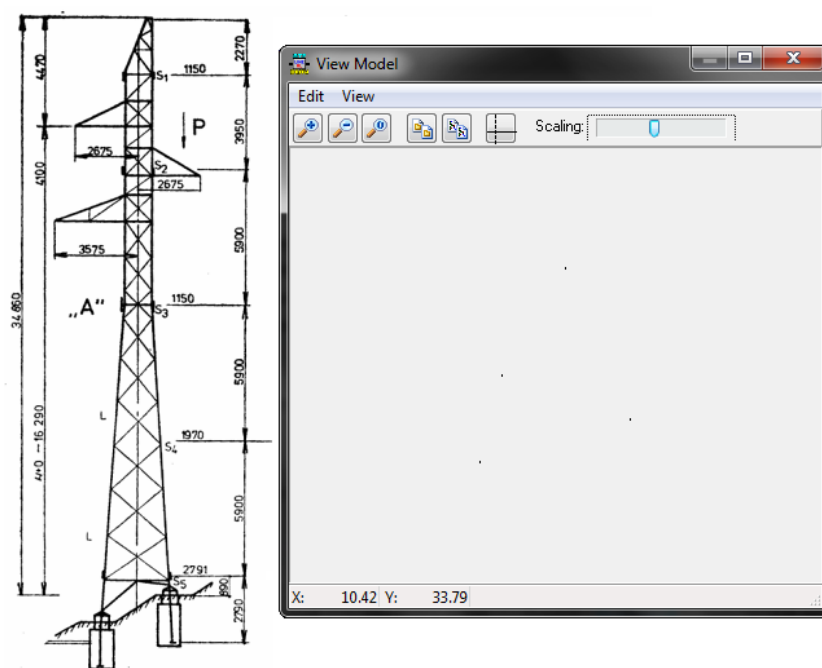
Obrázek 5 - Schéma zapojení modelu pro zpětný přeskok

Jako model vedení samotného je zde vybrán článek LCC, který byl volen dle vstupních parametrů vedení (vzhledem k detailnějšímu modelování vedení se stožáry, je nejlepší volbou právě model LCC, jelikož umožňuje nadefinovat rozmístění vodičů na stožáru). Nastaven je dle Obrázku 6, kde „React“ znamená reaktanci vodiče na kilometr délky, „Rout“ vnější poloměr vodiče, „Resis“ odpor vodiče na kilometr délky, „Horiz“ horizontální rozmístění vodičů vzhledem k vertikální středové ose, „Vtower“ výšku zavěšení lana na stožáru a „Vmid“ prověšení lana. Vedení je nastaveno jako čtyřvodičové, přičemž horní vodič (tlustší čára ve schématu na prvku LCC) obsahuje trojfázovou soustavu a spodní vodič představuje zemnicí lano. V modelu elementu vedení jsou pak fázové vodiče označeny číslem 1 až 3 a zemnicí lano číslem 4.

	Ph.no.	React	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[ohm/km AC]	[cm]	[ohm/km AC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0.4091	1.88	0.156	-2.675	30.39	30.39
2	2	0.4091	1.88	0.156	2.675	28.59	28.59
3	3	0.4091	1.88	0.156	-3.575	26.79	26.79
4	4	0.2021	1.5	0.596	0	34.86	34.86

Obrázek 6 - Nastavení elementu vedení

Parametry vedení jsou voleny reálně¹, poloměry vodičů jsou na základě znalosti hodnoty celkových průřezů vypočteny. Na Obrázku 7 je vidět porovnání modelu v EMTP-ATP a reálné předlohy stožáru pro vedení 110 kV; tečky v pravé části obrázku ukazují rozmístění jednotlivých vodičů.



Obrázek 7 - Porovnání zadání modelu stožáru s předlohou²

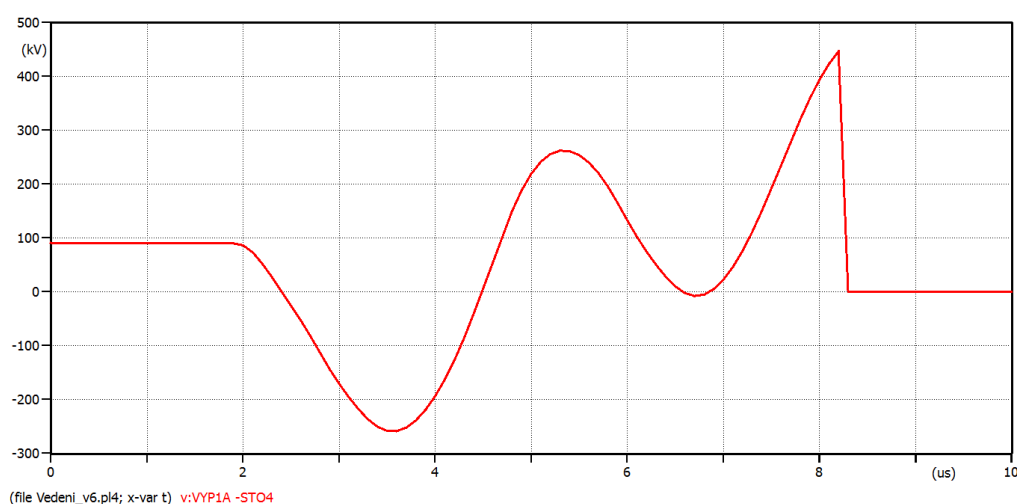
Model stožáru je tvořen náhradní indukčností stožáru, odporem stožáru a odporem země. Náhradní indukčnost stožáru je volena dle normy ČSN 33 0419-4 [8] pojednávající o koordinaci izolace a je určena jako 1 μH na metr délky stožáru. Výsledná hodnota indukčnosti je tedy 34,86 μH . Odpor stožáru je orientačně určen hodnotou 10 Ω a odpor uzemnění, který se u stožárů pohybuje zhruba

¹ Soubor s tabulkami dostupný z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/katalogy/parametry.doc

² Levá strana obrázku dostupná z <http://www.tzb-info.cz/docu/clanky/0041/004192o4.gif>

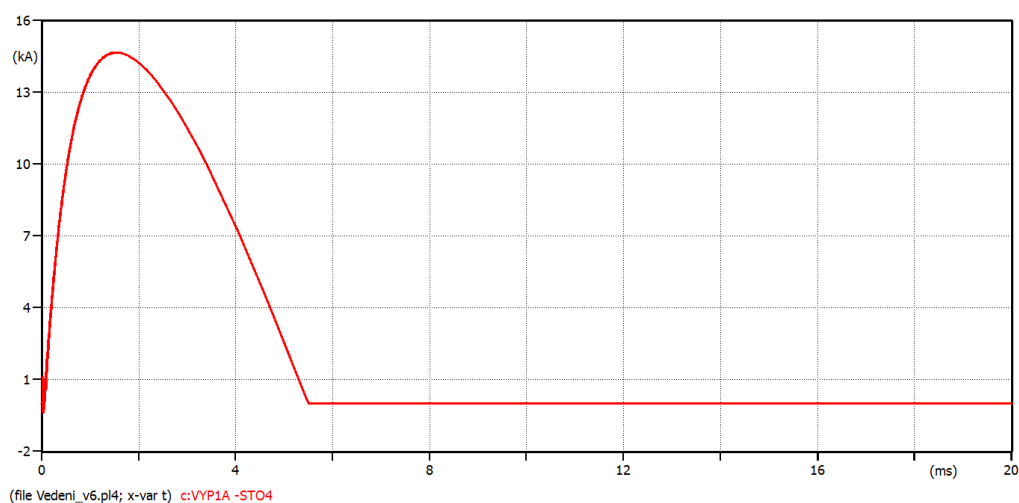
v rozmezí 5 – 30 Ω , je volen 10 Ω (tento parametr závisí na prostředí, ve kterém se stožár nachází). Stožár je uzemněn a je k němu připojena ideální proudová sonda. Stožáry jsou od sebe navzájem vzdáleny 400 m, což je také v toleranci podle reálných vzdáleností stožárů, které se pohybují v rozmezí 300 – 500 m.

Vedení je nezatíženo, což při vzniku přepětí na vedení představuje nejhorší možný stav. Na konci vedení je umístěn napěťově řízený spínač nastaven na ochrannou hladinu 450 kV (jedná se o ochrannou hladinu pro 110 kV [9]). Aby byl dodržen princip uhasnutí elektrického oblouku v nule proudu, je nastavení upraveno na minimální dobu sepnutí spínače 1 ms a vypínací proud nastaven na hodnotu 0 A. Spínač tedy funguje tak, že se při překročení napětí 450 kV sepne (dojde ke zpětnému přeskoku) a zůstane sepnut do doby než uplyne čas 1 ms a zároveň dokud proud neprojde nulou. Pokud se obě tyto podmínky splní, spínač se opět otevře.



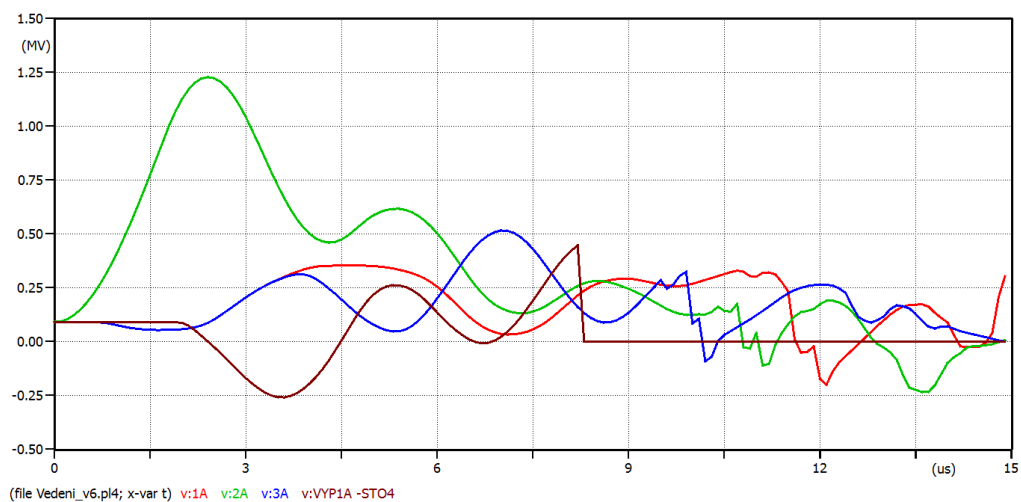
Obrázek 8 – Průběh napětí při zpětném přeskoku

Po spuštění modelu dostaneme tyto výsledky. Jak lze vidět na detailu napětí na obrázku 8, přepětí vzniklé bleskem je superponováno díky odraženým vlnám (rychlost vlny je 300 m / μ s a tudíž se dostává do místa zpětného přeskoku, vzdáleného 600 m za 2 μ s) a narůstá až do hodnoty přeskokového napětí 450 kV. V tom okamžiku dochází ke zpětnému přeskoku, začíná hořet oblouk a proud roste až téměř na hodnotu 15 kA (Obrázek 9) přičemž napětí klesne na nulovou hodnotu. V důsledku odeznění atmosférického impulsu a protože není znovu iniciován jeho vznik (izolační hladina již není překročena), je oblouk při průchodu proudu nulou uhašen a proud opět klesá na nulu.



Obrázek 9 - Průběh proudu při zpětném přeskoku

Po odeznění zpětného přeskoku se napětí vrací zpět na jmenovitou hodnotu. Je však nasuperponované díky odrazům od konců vedení.

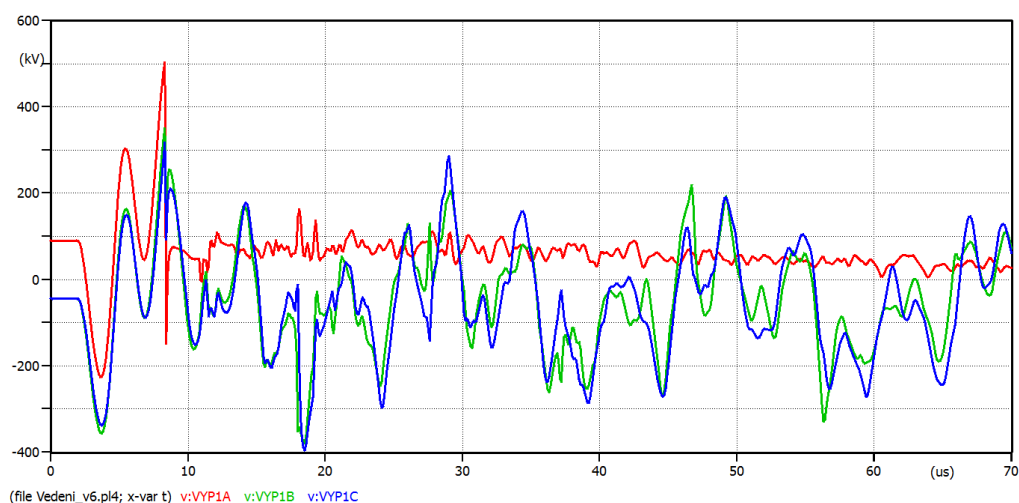


Obrázek 10 - Přepětí na stožárech a v místě úderu

Na Obrázku 10 jde vidět, že při úderu do zemnicího lana nastane největší přepětí díky naindukovaní napětí na vedení v místě úderu (v:2A). Černý průběh je průběh napětí mezi fázovým vodičem a zemnicím lanem (napětí zpětného přeskoku z Obrázku 8). Když nastane zpětný přeskok, začne procházet proud a vznikne prudká změna napětí. Jelikož se jedná o model s rozprostřenými parametry, je tato změna v závislosti na vzdálenosti jednotlivých míst v průběhu odstupňována v čase. V bodě 3 dojde ke změně napětí jako první a v bodě 1 jako poslední. Vzhledem ke stejné

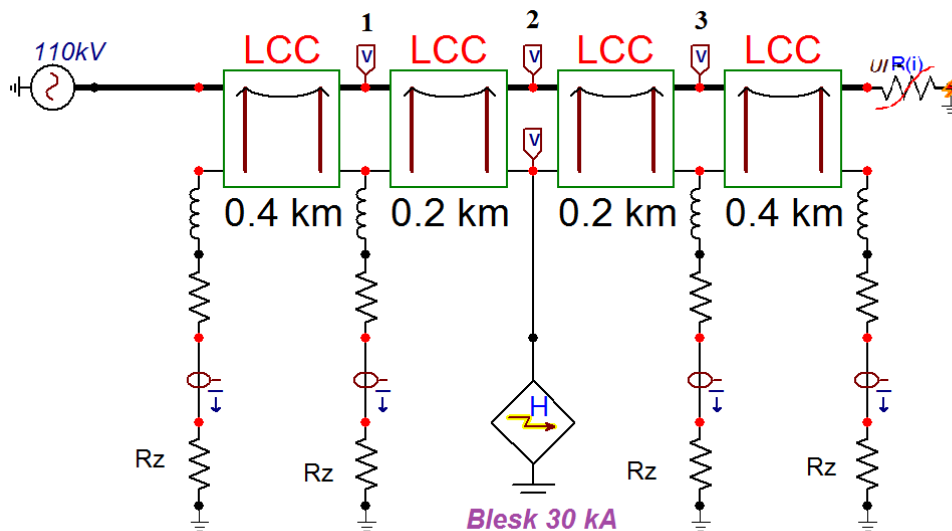
vzdálenosti bodů 1 a 3 od místa úderu by měly být hodnoty napětí v těchto místech stejné. Nejsou však z důvodu různého odrazení vlny z obou konců vedení. Z jedné strany se vlna vrací s opačnou polaritou a výsledný superponovaný průběh je tedy jiný než na straně druhé. Na Obrázku 10 lze také pozorovat efekt tlumení, kdy je přepětí vzniklé ve vzdálenějších místech nižší, než v místech bližších. Na těchto průbězích jde vidět, že by došlo k přeskoku i na stožáru v místě 3, v modelu je však pro názornost a jednoduchost uvažován vznik zpětného přeskoku pouze jednofázově a na konci vedení, v případě potřeby by se však dalo počítat i se vznikem zpětného přeskoku v tomto místě.

Obrázek 11 ukazuje fázová napětí na konci vedení. Je zřejmé, že ve fázi s označením 1A nastal zpětný přeskok, jelikož došlo ke snížení napětí v této fázi. Ve fázi 1B a 1C dochází ke zvýšení napětí jako při jednofázovém zkratu. Dochází tedy k nesymetrii napětí vlivem protékání nadproudu a následnému snížení napětí ve fázi 1A. Napětí je zde zvýšeno také díky vzájemné indukční vazbě mezi vodiči při skokovém snížení napětí při zpětném přeskoku v postižené fázi. Napětí ve fázi 1A není nulové a děje se tak z důvodu již několikrát zmiňované indukční vazby mezi vodiči a také díky odrazům vln od konců vedení.



Obrázek 11 – Fázová napětí v místě zpětného přeskoku

3.2 Modelování působení přepět'ové ochrany při úderu do zemnicího lana a do vedení



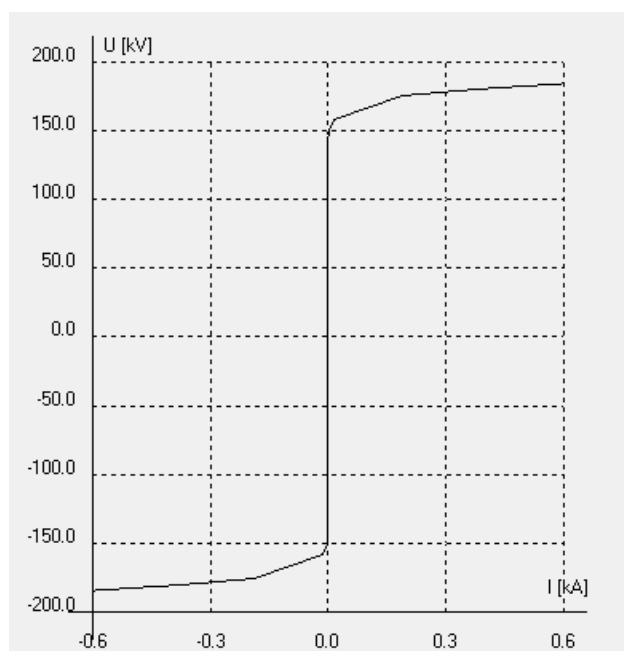
Obrázek 12 - Schéma zapojení pro ochranné působení přepět'ové ochrany

Na Obrázku 12 je schéma zapojení pro modelování ochranného působení. Jedná se o stejné schéma jako v předchozím případě s tím rozdílem, že na místě napět'ově řízeného spínače je připojen nelineární prvek simulující nelineární charakteristiku přepět'ové ochrany. Tento prvek je připojen na fázový vodič a je uzemněn s parametrem „short circuit“, který značí zkratování všech fází. Připojením ochrany na konec vedení se simuluje udržování ochranné hladiny např. při vstupu do rozvodny.

Počítání nelineární charakteristiky a experimentování s nastavením nelineárních prvků je složité a mnohdy velmi pracné, proto zde bylo využito kalkulačky³ pro výpočet hodnot nelineární charakteristiky k zadání do programu EMTP-ATP. Do kalkulačky se vkládá parametr U_c což je trvalé provozní napětí omezovače, které je zvoleno dle normy a to 75 kV. Dalším údajem zadávaným do kalkulačky je třída ochrany; zvolena byla třída ochrany 3 [10]. Následné vypočtené hodnoty jsou pak zadány do položky “characteristic” nelineárního prvku a vytvoří výslednou charakteristiku, která je na Obrázku 13.

³ Kalkulačka je dostupná z:

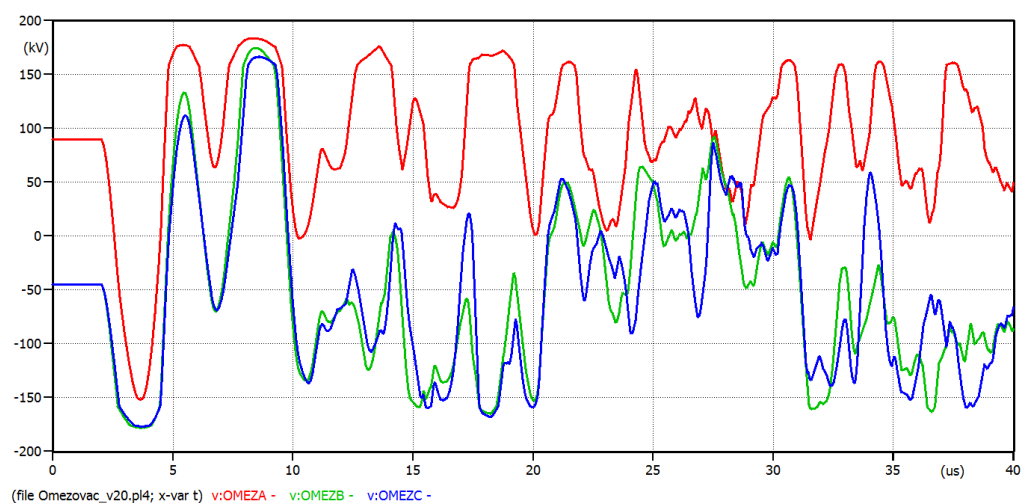
http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/Arrester_Characteristics_for_ATPDraw_Users.xls



Obrázek 13 - Charakteristika nelineárního prvku

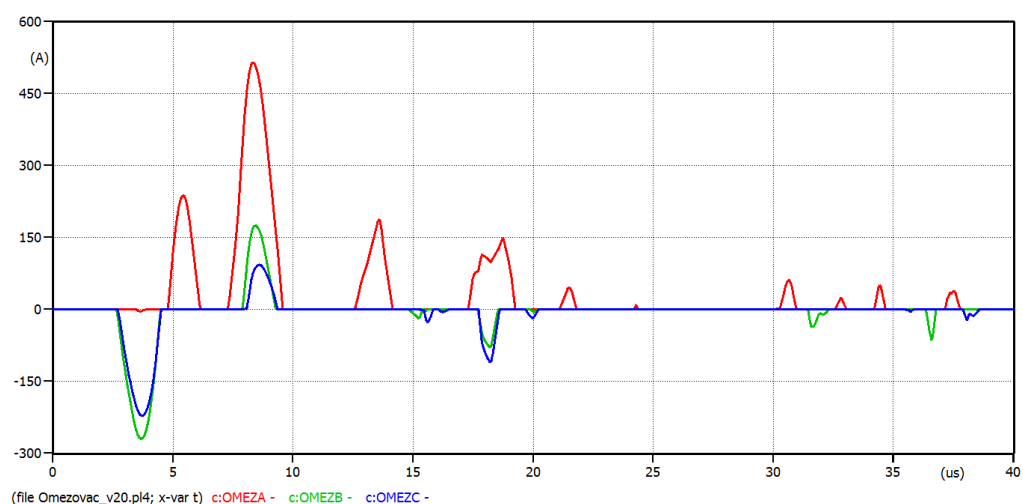
Z průběhu napětí na Obrázku 14 vidíme, že při úderu blesku narůstá na ochraně napětí až do hodnoty zapalovacího napětí, které má podle simulovaného průběhu i charakteristiky ochrany hodnotu zhruba 150 kV. V tom okamžiku začne ochranou protékat proud. Na hodnotu napětí má velký vliv doba chodu vlny po vedení, ta urazí 300 m za μs (šíří se tedy teoretickou rychlostí světla). Při použité délce modelu 1,2 km udeřil blesk doprostřed vedení, takže se vlna dostane na konec vedení (místa s největší nehomogenitou) za 2 μs a zpět za další 2 μs . Dohromady tedy trvá vlně dostat se zpět do místa úderu 4 μs , přičemž se do místa úderu vrací jedna vlna s opačnou polaritou. Tím, že je doba návratu zpětné vlny do místa úderu kratší než je trvání atmosférického impulsu, působí na přicházející vlnu stále ještě narůstající část impulsu. Proto se napětí drasticky deformuje.

Je zřejmé, že každé další vzniklé přepětí ochrana opět sníží. Z průběhu proudů (Obrázek 15) jde vidět, že ochrana při jednotlivých překročeních zapalovacího napětí začne opět působit a začne jí protékat proud. Maximální hodnota protékajícího proudu bude postupně klesat spolu s klesající energií vlny díky množství odrazů a jejího tlumení v obvodu s rozprostřenými parametry.



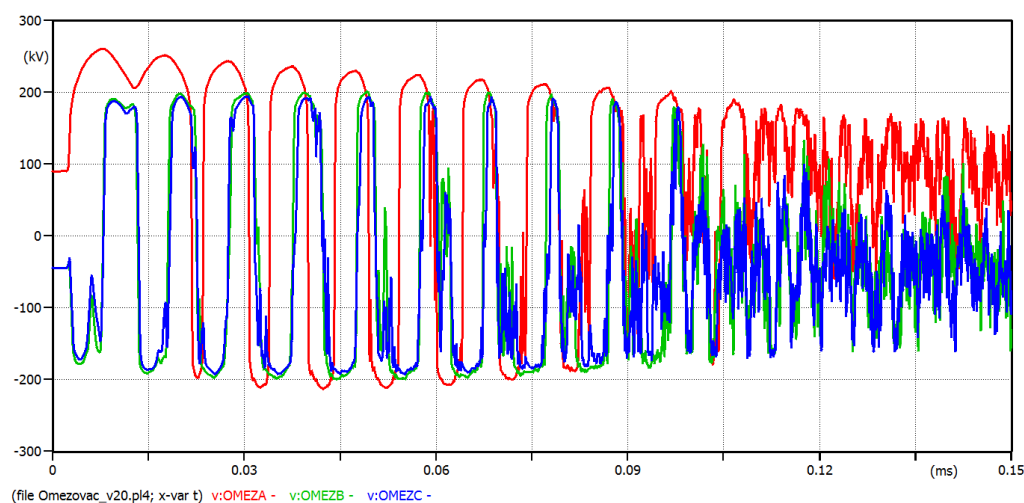
Obrázek 14 - Průběhy napětí na ochraně při úderu do zemnicího lana

Obrázek 15 také ukazuje, jak jsou následná přepětí tlumena díky amplitudě procházejících proudů. V návaznosti na Obrázek 14 je názorně ukázáno, že čím je překročení zapalovacího napětí ochrany větší, tím větší proud ochranou prochází.



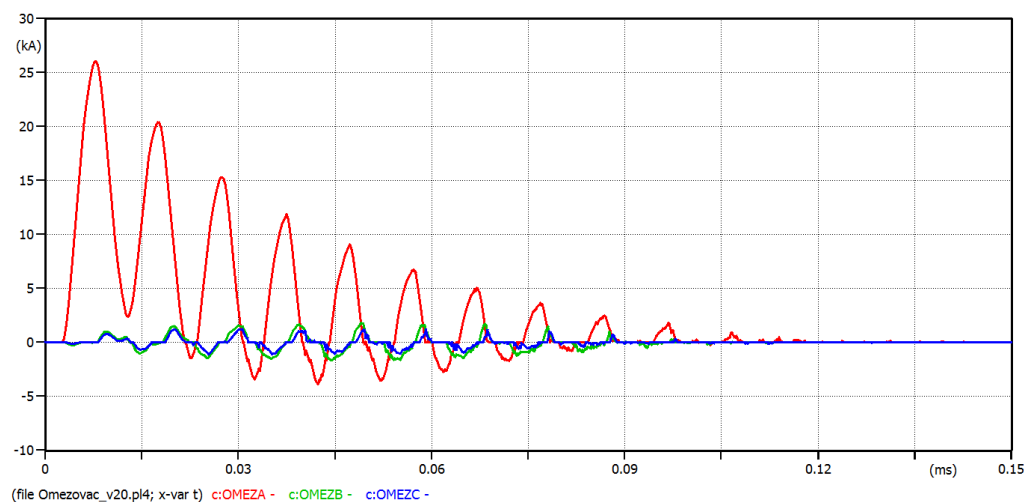
Obrázek 15 - Průběhy proudu na ochraně při úderu do zemnicího lana

Při experimentálním modelování úderu do fázového vodiče se na ochraně objeví v postižené fázi mnohonásobně větší napětí než při úderu do zemnicího lana. Zapalovací napětí je v modelovém případě překročeno o více než 73% a dosahuje hodnot až 260 kV (Obrázek 16).



Obrázek 16 - Průběhy napětí na ochraně při úderu do fázového vodiče

Úměrně tomu tečou ochranou větší proudy, které v postižené fázi dosahují řádově desítek kA (Obrázek 17). To je dáno charakteristikou ochrany, která není úplně pravoúhlá a tudíž se s vyšším napětím odvádí mnohem větší proud. Vlivem indukční vazby mezi vodiči dochází také k indukovanému napětí do ostatních fází a tudíž ke zvýšení napětí v nepostížených fázích, což má za následek také překročení zapalovacího napětí ochrany. Ochrana také trvá delší dobu než omezí vzniklá přepětí a nastaví tak zpět ochrannou hladinu.



Obrázek 17 - Průběhy proudu na ochraně při úderu do fázového vodiče

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat ucelený základní přehled o ochranách před úderem blesku a namodelovat v programu EMTP-ATP dva důsledky úderu blesku do vedení.

Z modelovaných stavů, které mohou po úderu blesku nastat je jasné, že je vedení silově a tepelně namáháno obrovskými hodnotami napětí a proudů, které je nutno korigovat tak, aby nedošlo k poškození připojených zařízení nebo izolace vodičů.

V dnešní době jsou nejpoužívanějším typem přepět'ové ochrany svodiče na bázi ZnO, které téměř úplně vytlačily dříve používané ventilové bleskojistky. Je tomu tak díky jejich vynikajícím vlastnostem co se týká údržby, protékajícího proudu a konstrukce. Mohou být používány jak ve střídavých, tak i stejnosměrných sítích, což umožňuje plochá V - A charakteristika. Použity mohou být i v sítích vysokého napětí díky jejich schopnosti snášet spínací přepětí.

Pro další studii této problematiky by se dala použít reálná síť modelovaná v programu EMTP-ATP vztažená k reálně zaznamenané situaci, přičemž by se spojily oba zde studované případy; tedy zpětný přeskok s působením přepět'ové ochrany. Poté by se provedla komplexní analýza problému s možností jiných hodnot bleskových proudů s jinými nastaveními přepět'ových ochran v návaznosti na tuto práci. Přitom by došlo ke zpřesnění uvedených tvrzení díky použití mnohem delšího modelu vedení, ve kterém by nedocházelo k tak velkému ovlivňování průběhů vlivem odražených vln jako v případě vybraného krátkého elementu vedení v tomto případě.

Literatura

- [1] *Climate change 'will make lightning strike more'*. GILL, Victoria. BBC NEWS. [online]. 13.11.2014 [vid. 2014-11-19]. Dostupné z: <http://www.bbc.com/news/science-environment-30023536>
- [2] SKŘEHOT, Petr A. *Stručné základy teorie bouřek*. [pdf]. Praha : Meteorologická operativní rada, sekce odborných studií a popularizace meteorologie, 2004. [vid. 2014-8-15]. Dostupné z: <http://www.astronomie.cz/download/strucne-zaklady-teorie-bourek.pdf>
- [3] MACH, Věslav. *Technika vysokého napětí*. 2. přepracované vydání. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1161-8
- [4] HLAVÁČ, Albert. *Bojíte sa blesku?* Bratislava : Alfa 1986
- [5] *Lightning protection guide*. 2nd updated ed. Neumarkt: Dehn, 2007, 328 s. ISBN 3-00-015975-4.
- [6] PNE 33 0000-8. *Navrhování a umístování svodičů přepětí v distribučních sítích nad 1 kV do 45 kV*. REAS ČR ZSE, 2005. Dostupné z: http://www.csres.cz/Upload/PNE_33_0000_81.pdf
- [7] MALÝ, Jiří. *Přepětí v sítích vysokého napětí*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky.. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/2805>
- [8] ČSN 33 0419-4. *Koordinace izolace : Část 4: Průvodce výpočty koordinace izolace a modelováním elektrických sítí*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2006.
- [9] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. *Průmyslová elektroenergetika*. [doc]. Plzeň : Západočeská univerzita, 2000 [vid. 2015-3-12]. Kapitola 4, Napěťové poměry v distribuční soustavě. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap4.pdf>
- [10] PNE 33 0000-9. *Navrhování a umístování svodičů přepětí v sítích nad 110 kV*. REAS ČR ZSE, 2010. Dostupné z: <http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%200000-9.pdf>
- [11] ČSN ISO 690. *Informace a dokumentace : Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2011.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Bouřkový oblak při srážkové činnosti	10
Obrázek 2 - Indukování kladného náboje na zemském povrchu při bouřce.....	10
Obrázek 3 - Provedení ochranných jiskřišť	15
Obrázek 4 - Schématická značka bleskojistky.....	17
Obrázek 5 - Schéma zapojení modelu pro zpětný přeskok	18
Obrázek 6 - Nastavení elementu vedení.....	19
Obrázek 7 - Porovnání zadaného modelu stožáru s předlohou.....	19
Obrázek 8 – Průběh napětí při zpětném přeskoku	20
Obrázek 9 - Průběh proudu při zpětném přeskoku	21
Obrázek 10 - Přepětí na stožárech a v místě úderu	21
Obrázek 11 – Fázová napětí v místě zpětného přeskoku	22
Obrázek 12 - Schéma zapojení pro ochranné působení přepěťové ochrany	23
Obrázek 13 - Charakteristika nelineárního prvku	24
Obrázek 14 - Průběhy napětí na ochraně při úderu do zemnicího lana	25
Obrázek 15 - Průběhy proudu na ochraně při úderu do zemnicího lana	25
Obrázek 16 - Průběhy napětí na ochraně při úderu do fázového vodiče.....	26
Obrázek 17 - Průběhy proudu na ochraně při úderu do fázového vodiče	26